



⑮ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenl gungsschrift**
⑩ **DE 100 19 430 A 1**

⑤① Int. Cl. 7:
G 01 R 31/08
H 01 B 7/32
F 17 D 5/06

⑳ Aktenzeichen: 100 19 430.3
㉔ Anmeldetag: 19. 4. 2000
㉕ Offenlegungstag: 25. 10. 2001

DE 100 19 430 A 1

㉑ Anmelder:
Peter Lancier Maschinenbau-Hafenhütte GmbH &
Co KG, 48167 Münster, DE

㉒ Vertreter:
v. Bezold & Sozien, 80799 München

㉓ Erfinder:
Vemmer, Helmut, 42329 Wuppertal, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Verfahren zur Mantelfehlerortbestimmung in Kabelsystemen mit Sensorader

⑤⑦ Bei einem Mantelfehlerortungsverfahren für Kabel, bei dem in eine Sensorader eines Kabels ein Messstrom eingespeist wird und bei einem Kabelmantelfehler auftretende Messsignaländerungen ausgewertet werden, wird eine die Sensorader einschließende Sensorschleife gebildet, in die ein konstanter Messstrom erdfrei eingespeist wird. Die dabei am Anfang und Ende der Sensorschleife gegenüber einem Bezugspotential auftretenden Spannungen werden gemessen und durch Bildung des Verhältnisses dieser Spannungen wird der Fehlerort bestimmt.

DE 100 19 430 A 1

Beschreibung

[0001] Kabel, insbesondere Erdkabel und Seekabel, haben einen wasserdichten Kunststoffmantel. Befindet sich unter dem Kunststoffmantel eine metallische Bewehrung zur mechanischen Stabilisierung und/oder zur elektrischen Abschirmung, so ist diese metallische Bewehrung geerdet. Das Kabelinnere mit den elektrischen Leitern kann durch weitere

[0002] Treten im äußeren Kunststoffmantel Beschädigungen auf, so wird zunächst die metallische Abschirmungsbewehrung von eindringendem Wasser befeuchtet.

[0003] Diesbezüglich ist es naheliegend, gemäß dem Stand der Technik, einen Sensordraht in den Bereich der metallischen Bewehrung mitzuführen, um Wassereintritt sofort zu melden. Der Sensordraht ist im trockenen Zustand vollkommen isoliert vom geerdeten Kabelmantel. Durch Gewebeiisolation oder sonstige perforierte Isolation des Sensordrahtes ist bei Befeuchtung mit eindringendem Wasser ein niedriger Übergangswiderstand zum geerdeten Kabelmantel gegeben. Sollte kein geerdeter Kabelmantel gegeben sein, stellt sich ein entsprechend höherer Übergangswiderstand zum Erdreich ein.

[0004] Fehlerortungsverfahren nutzen den Effekt des einnässenden Sensordrahtes nicht nur zur Erkennung des defekten Kabelmantels, sondern berechnen aus den Sensordrahtdaten ebenfalls den Fehlerort (siehe DE 195 27 972.7 und DE 195 44 391.8). Bei bekannten Messverfahren gemäß Fig. 1 werden die Ströme I_1 , I_2 und I_3 erfasst, um über deren Aufteilung den Fehlerort zu ermitteln. Zum einfacheren Verständnis wird eine zweiphasige Version nach Fig. 2 betrachtet. Die Ströme verhalten sich umgekehrt proportional zu den Widerständen der Sensorleitungslängen. Da die Leitungssensoren am Kabelende verbunden sind, ergibt sich die relevante Sensorlänge jeweils vom Kabelanfang bis zum Fehlerort nach der Beziehung:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{\text{Länge } 2}}{R_{\text{Länge } 1}}$$

[0005] Soll das Stromverhältnis $I_1 : I_2$ die korrekte Kabellänge $R_{\text{Länge } 2} : R_{\text{Länge } 1}$ wiedergeben, so darf das Stromaufteilungsverhältnis ausschließlich nur von den Sensorlängen vom Kabelanfang bis zum Fehlerort beeinflusst sein. Zusätzliche Messwiderstände, z. B. R_1 und R_2 zum Erfassen der Ströme I_1 und I_2 sind den Sensorwiderständen in Serie geschaltet und verfälschen damit die Stromaufteilung.

[0006] Beispielhaft sei dargestellt:

Bei üblichen Sensorwiderständen von ca. $50 \Omega/\text{km}$, einer Kabellänge von 1 km und einem Fehler auf halber Kabellänge ergibt sich eine Widerstandsaufteilung der Kabelschleife $R_1 : R_2$ von $25 : 75 \Omega = 1 : 3$, dementsprechend eine Stromaufteilung $I_1 : I_2$ von $3 : 1$.

[0007] Werden zur Erfassung der Ströme Messwiderstände R_1 und R_2 von jeweils 25Ω eingefügt, so ergibt sich eine Widerstandsaufteilung von $50 : 100 \Omega$, dementsprechend eine Stromaufteilung von $I_1 : I_2$ von $2 : 1$, was nicht mehr die Sensorlängen bis zum Fehlerort widerspiegelt. Um zu richtigen Ergebnissen zu kommen, müssen Messwiderstände und ggf. Zuleitungswiderstände bis zum Kabelanfang herausgerechnet werden. Eine erforderliche Korrekturrechnung ist insbesondere bei einem Drehstromsystem aufwendig, da alle in der Messanordnung vorkommenden Widerstände:

Messwiderstände R_m
Zuleitungswiderstände R_z
Sensorwiderstände R_s
Abschlussmesswiderstände R_A
gemeinsamer Abschluss Widerstand R_B
Erdfehlerwiderstand R_E

mit ihrer momentanen Temperaturabhängigkeit zu berücksichtigen sind. Die Ströme, die über einen Erdfehlerwiderstand R_E (im Beispiel Fig. 2 I_1 und I_2) über das Erdpotential zur treibenden Quelle U_B zurückfließen, können am undefinierten Erdfehlerwiderstand und durch Wärmeeinwirkung zu Schwankungen des Fehlerwiderstandes führen, dies um so mehr, je dichter der Mantelfehler zum Kabelanfang rückt, wodurch die Messströme größer werden und der Effekt sich verstärkt. In der Korrekturberechnung erscheinen alle Spannungen, Ströme und Widerstände als absolut zu berücksichtigende Größen, wodurch sich eine Reihe von Fehlermöglichkeiten in einer umfangreichen Fehlerortungsgleichung ergeben, zumal alle Widerstände nicht absolut stabil, sondern von der Temperatur abhängig sind, was insbesondere für die Kabelwiderstände aufgrund der Temperatur eines Energiekabels oder der Messwiderstände aufgrund der unterschiedlichen Messströme oder der einwirkenden Wechselströme aus dem Kabel gegeben ist.

[0008] Beispiel für die Berechnungsgleichung eines Drehstrom-Dreifach-Kabelsystems gemäß Fig. 1:

- ohne Berücksichtigung von Zuleitungswiderständen des Mess-Systems
- ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Kabellängen 1 bis 3

Ortungsgleichung

Quelle: Fortschritt-Berichte VDI-Verlag
Reihe 21: Elektrotechnik Nr. 212

$$L_1 = \frac{1}{R'_s} \cdot \frac{R_B \cdot R_m \cdot (I_2 - I_1) - (L_{ges} \cdot R'_s + R_A) \cdot ((U - (R_m + R_A + L_{ges} \cdot R'_s) \cdot I_2) - R_B (2 \cdot I_1 + I_3))}{R_B (I_1 + I_2 + I_3) - U + (R_m + R_A + L_{ges} \cdot R'_s) \cdot I_2}$$

mit:

I_1 = Strom in Zweig 1

I_2 = Strom in Zweig 2

I_3 = Strom in Zweig 3

R_m = Meßwiderstand

R'_s = Sensorwiderstandsbelag

R_A = Abschlußwiderstand

R_B = Betriebswiderstand

L_1 = Entfernung der Fehlerstelle vom Meßpunkt 1

L_{ges} = Gesamtlänge des Kabels

[0009] Werden für den praktisch realistischen Fall die Leitungslängen zum Kabelanfang in die Rechnung einbezogen und ferner berücksichtigt, dass die Phasenlängen beim Dreifach-Kabelsystem aufgrund großer Verlegungsradien unterschiedlich lang sind, ergibt sich eine Berechnungsgleichung des mehrfach dargestellten Umfangs. Bei Energiekabeln ergibt sich bei diesem bekannten Messverfahren zusätzlich ein Wärmeproblem für die Messwiderstände R_m .

[0010] Wird z. B. eine induzierte Wechselspannung von 100 V effektiv im Sensordraht entsprechend $100 \text{ V} \times 1,73 = 173 \text{ V}$ zwischen den Sensordrahtphasen des Drehstromsystems zugelassen und ein Mess- und Abschlusswiderstand von je 10Ω eingesetzt, bei einem Widerstand des Sensordrahtes von 40Ω , so ergibt sich überschlagsweise nach der Beziehung:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_{m1} + R_{m1} + R_{m1} + R_{m1} + R_{m1} + R_{m1}} = \frac{173}{10 + 40 + 10 + 10 + 40 + 10} = 1,44 \text{ A}$$

in den drei Messwiderständen R_m .

[0011] Nach der Leistungsberechnung $N = I^2 \times R$ ergibt dies für Präzisionsmesswiderstände die ungewöhnliche Leistung von etwa 20 W je Messwiderstand. Da Messwiderstände sich nicht stark erwärmen sollen, müsste jeder Widerstand für etwa 100 W ausgelegt sein.

[0012] Jeder Techniker kann sich leicht vorstellen, dass ein Messwiderstand mit 0,01% Genauigkeit in der Größenordnung 0,2 bis 0,5 W geläufig ist, nicht jedoch mit 100 W. Aus vorstehenden Fakten ist leicht zu ersehen, dass ein Messverfahren insbesondere für Energiekabel nach dem bekannten Messverfahren theoretisch möglich, praktisch jedoch nicht sinnvoll realisierbar ist.

[0013] Ein Messverfahren, nach Fig. 3 nachfolgend beschrieben, vermeidet alle Fehler der vorstehenden Berechnungsgleichung, da sämtliche Widerstandsgrößen incl. der Messwiderstände eliminiert sind und somit auch die Sensordrahttemperatur nicht in die Fehlerortung eingeht. Als Vorgabe wird bei diesem Messverfahren nur die Kabellänge benötigt und die Spannungen U_1 , U_2 , U_3 jeweils gemessen.

[0014] Zum einfacheren Verständnis wird eine zweipolige Version nach Fig. 4 betrachtet. Während beim Messverfahren nach Fig. 1 und 2 die Spannungsquelle U_B Ströme über den Fehlerwiderstand R_E gegen Erde treibt, wird beim Messverfahren nach Fig. 3 und 4 ein erdfreier Strom über die Sensorschleife geschickt. Entsprechend dem Sensorwiderstand stellt sich eine erdfreie Schleifenspannung ein, sofern kein Erdfehler vorliegt. Stellt sich ein Erdfehler R_E ein, so ist die Schleifenspannung erdbezogen. Die erdbezogenen Spannungen können gemäß Fig. 4 als Spannung U_1 und U_2 der linken und rechten Schleifenteils Spannung gemessen werden. Die Addition beider Spannungen entspricht der gesamten Schleifenspannung. Da über den Erdfehler R_E im Gegensatz zur Schaltung nach Fig. 1 und 2 kein Strom fließt, fällt über diesen Widerstand auch keine Spannung ab. Somit sind bei diesem Verfahren die gemessenen Spannungen U_1 und U_2 unabhängig vom undefinierten Erdfehler. Die gemessenen Teilspannungen U_1 und U_2 fallen an den Widerständen der Sensorleitungen L_1 und L_2 jeweils vom Kabelanfang bis zum Fehlerort ab. Die Spannungen $U_1 : U_2$ stehen also im gleichen Verhältnis wie die Sensorlängen Länge 1 : Länge 2. Ist die Sensorlänge (= Kabellänge) bekannt, so ergibt sich der Fehlerort vom Kabelanfang aus gemessen nach der einfachen Verhältnisrechnung

$$\text{Fehlerort}_{\text{von } L_1 \text{ aus gemessen}} = \frac{\text{Kabellänge 1} + \text{Kabellänge 2}}{U_1 + (-U_2)} \times U_1$$

$$\text{Fehlerort}_{\text{von } L_2 \text{ aus gemessen}} = \frac{\text{Kabellänge 1} + \text{Kabellänge 2}}{U_1 + (-U_2)} \times (-U_2)$$

[0015] Da es sich um eine reine Verhältnisrechnung zwischen Sensorlängen und den darüber abfallenden Spannungen handelt, die konstant stromgespeist sind, werden weder Messwiderstände benötigt, noch spielt die Größe des Erdfehlers R_E eine Rolle, da über R_E kein Messstrom abfließt.

[0016] Die Vorzüge, mit weniger fehlerhaften Mess- und Rechengrößen genauere Ergebnisse zu erzielen, liegen auf der Hand. Das nachfolgend beschriebene Verfahren kombiniert deshalb erfinderische Schaltungsfunktionen mit dem prinzipiellen Messaufbau nach Fig. 3 und 4. Die Messung nach Fig. 3 und 4 ist jedoch nur möglich, wenn es sich um freigeschaltete, spannungsfreie Leitungsadern, die am Ende verbunden werden, handelt.

[0017] Die Aufgabenstellung des nachfolgend beschriebenen Verfahrens besteht nun darin, eine Mantelfehlerortung an Hochspannungskabeln ohne Abschaltung während des Betriebes, wobei die Sensorader unter Spannung steht und aufgrund des geringen Innenwiderstandes einen hohen Strom treiben kann, auszuführen.

[0018] Der im Kabelmantel eingebettete Sensordraht wirkt insbesondere bei Koaxialkabeln nach Fig. 6 und 7 wie die Sekundärwicklung eines Transformators, wobei als Primärwicklung der laststromführende Innenleiter des Koaxialkabels wirkt. Bei der Messschaltungs-Auslegung muss deshalb sichergestellt sein, dass kein Wechsel-Kurzschlussstrom vom Kabel ins Messsystem fließt, da das mit Gleichstrom arbeitende Messverfahren dann nicht mehr richtig messen und zudem bei größeren Strömen zerstört würde.

[0019] Eine prinzipielle Schaltungsanordnung und deren Funktion sei an Fig. 6, einem Zweifach-Kabelsystem für Bahnstromanlagen, erläutert. Jede getrennt verlegte Koaxialphase führt im Mantelbereich eine Sensorader mit, die am Kabelende verbunden ist. Über die Sensoradern L_{S1} und L_{S2} wird von einer erdfreien Batteriespannung U_B über eine Stromsenke ein Konstant-Gleichstrom in die Sensorschleife gespeist. Dies hat folgenden Sinn:

1. Der Innenwiderstand der Stromquelle U_B passt sich automatisch an die Kabellänge und den Sensorwiderstand an. Bei kurzer Leitung steht eine kleine Spannung und bei längerer Leitung automatisch entsprechend eine größere Spannung am Einspeisepunkt der Kabelanfänge zur Verfügung.
2. Auch bei Sensor Kurzschluss direkt am Kabelanfang oder beide Sensoradern gegen Erde kurzgeschlossen, ist keine Überlastung der Spannungsquelle U_B und keine Überlastung eines Messwiderstandes möglich, da jederzeit nur der eingestellte Konstantstrom fließt.
3. Nach der Beziehung $U = I \times R$ kann der maximale Messbereich U durch Wahl der Konstantstromgröße auf den maximalen Sensorwiderstand entsprechend der vorgegebenen Leitungslänge abgestimmt werden.
4. Durch Einstellung des Konstantstromes auf eine durch 10 teilbare Größe, z. B. 10 mA, entspricht der Zahlenwert der angezeigten Spannungen $U_1 + U_2$ am Sensoranfang ohne Umrechnung direkt der Zahlenfolge des jeweiligen Sensorwiderstandes vom Kabelanfang bis zur Mantelfehlerstelle.
5. Bei frei zugänglicher Einstellung des Konstantstromes kann die Schleifenspannung U zahlenmäßig direkt auf die wirkliche Länge der Kabelschleife in Meter justiert werden. Für diesen Fall zeigen die Teilspannungen U_1 und U_2 zahlenmäßig direkt die Kabellängen in Meter vom jeweiligen Kabelanfang bis zum Kabelmantelfehler an.

[0020] Da der Konstantstrom aus einer erdfreien Spannungsquelle und Stromsenke die Kabelschleife speist und deshalb kein Strom über einen evtl. Erdfehler abfließt, ist der zufließende Strom I_1 gleich dem rückfließenden Strom I_2 . Die eingefügten Widerstände R_{11} und R_{12} bilden mit dem Kondensator C_1 für die induzierte Wechselspannung auf der Sensorleitung in Richtung Konstantstromspeisung einen Spannungsteiler, so dass die verbleibende Wechselspannung an C_1 so klein ist, dass die parallel zum Kondensator eingespeiste Konstantstromquelle weder gefährdet ist, noch die Genauigkeit der Gleichspannungsmessung beeinflusst wird. Die Widerstände R_{11} und R_{12} bilden in umgekehrter Richtung zum Kabel hin für die speisende Quelle U_B ebenfalls einen Spannungsteiler mit der niederohmigen Sensorschleife. Wegen der gewählten Konstantstromspeisung hat dieser Spannungsabfall jedoch keinerlei Einfluss auf die Größe der Schleifenspannung U oder die zu messenden Schleifenteilspannungen U_1 und U_2 . Der Schaltung liegt die Idee zu Grunde, dass die Widerstände R_{11} und R_{12} so gewählt werden, dass der effektive Wechselstrom nicht größer wird als der speisende Konstantstrom ist.

[0021] Bei dieser Schaltungsanordnung pulsiert der Wechselstrom positiv und negativ um die Gleichstromgröße, so dass als mittlere Verlustleistung nur die nicht zu umgehende Messgleichspannungsgröße auftritt, d. h. eine zusätzlich auftretende Wechselstrom-Verlustleistung ist bei der vorgegebenen Schaltung mit richtiger Auslegung nicht zu berücksichtigen, während bei einer Schaltung nach Fig. 1 (Mantelfehlerortung bei Hochspannungskabeln gemäß Stand der Technik) unter gleichen Kabel- und Sensorvoraussetzungen vergleichsweise mit ca. 20 W Wechselstromverlustleistung in hochgenauen Messwiderständen zu rechnen ist. Da bei etwa gleich großen Wechsel- wie Gleichströmen auch die Spannungsabfälle an R_{11} und R_{12} etwa gleich groß sind, gilt für das angegebene Schaltungsverfahren, dass die treibende Gleichspannung U_B des Stromgenerators größer sein muss, als der Scheitelwert der zugelassenen Sensorwechselspannung plus der gewünschten maximalen Schleifenmessspannung, z. B. 10 V. Bei einer realistischen Sensorspannung von zugelassenen bis max. 100 V ~ ergibt dies:

Generatorspannung $U_g = 100 \cdot \sqrt{2} + \text{max. Schleifenmessspannung}$

$U_g = 100 \cdot \sqrt{2} + 10 \text{ V}$

treibende Schleifenspannung $U_g = 150 \text{ V}$

[0022] Die zu messende Schleifenspannung U wird mit zwei Teilschleifenspannungen U_1 und U_2 vom Sensordraht L_{S1} und L_{S2} am Kabelanfang abgegriffen. Das Messsignal U_1 und U_2 geht jeweils über einen Tiefpassfilter R_{S1} , C_{S1} und R_{S2} , C_{S2} über die Leitungen S_1 und S_2 und wird dem Messsystem z. B. mit einem Messbereich von jeweils $\pm 10 \text{ V}$ zugeführt.

[0023] Die Messsignalabnahme an S_1 und S_2 erfolgt im Messsystem über extrem hochohmige Messverstärker, so dass nur das reine Spannungssignal ohne Stromfluss zur weiteren Auswertung genutzt wird. Da kein Gleichstrom fließt, fällt an den Filterwiderständen R_{S1} und R_{S2} auch keine Gleichspannung ab, die die Messwerte verfälschen könnte. Aus diesem Grund können die Widerstände R_{S1} und R_{S2} vorzugsweise direkt so groß gewählt werden, dass keine nennenswerten Wechselstrom-Leistungen der Widerstände anfallen. Beispielfhaft ergibt sich bei maximal 100 V Sensorwechselspannung und einem Normwiderstandswert von 150 k, der auf ein C von beispielsweise 1 μF arbeitet, das als Wechselspannungsteiler wirkt, eine Wärmeleistung von jeweils etwa 0,07 W an den Widerständen R_{S1} und R_{S2} . Da die Tiefpässe R_{S1} , C_{S1} und R_{S2} , C_{S2} jeweils einen Wechselspannungsteiler darstellen, werden die hohen Wechselspannungen von L_{S1} und L_{S2} auf den Gleichspannungsmessleitungen S_1 und S_2 auf einen für das nachfolgende Messsystem ungefährlichen Wert reduziert. Auf Grund der Konstantstromspeisung der Sensordrähte L_{S1} und L_{S2} die an den Kabelenden zusammengeschaltet sind, ergibt sich am Kabelanfang zwischen L_{S1} und L_{S2} eine konstante Schleifenspannung, die nur noch von der Kabeltemperatur über den Sensorwiderstand beeinflusst wird. Die abgegriffenen Spannungen U_1 und U_2 fallen über den Sensorwiderständen ab. Der Temperaturgang der Sensorschleife hat dennoch keinen Einfluss auf die Genauigkeit der

Mantelfehlerortung, da die Genauigkeit bei diesem Verfahren nicht von den absoluten Spannungen U_1 und U_2 , sondern lediglich vom Verhältnis der Spannungen $U_1 : U_2$ abhängt, was die Gesamtkabellänge dem Spannungsverhältnis entsprechend aufteilt. Liegt kein Mantelfehler vor, so wird die Gesamtschleifenspannung U über die abgegriffenen Messspannungen U_1 und U_2 jeweils mit $\frac{1}{2} U$ gegen Erde gemessen werden, da das Messsystem über die Erdleitungen einen Spannungsteiler bildet. Sind die Kabel 1 und 2 gleich lang, so ergibt sich ein fiktiver Erdfehler am Kabelende, obwohl kein Erdfehler vorliegt. Dieser Sonderfall des Messverfahrens wird vom beschriebenen Messsystem dazu genutzt, eine permanente Überwachung der Sensordrähte sowie des Messsystems durchzuführen, indem die Entfernung des Kabelendes nach der Berechnungsgleichung

$$\text{Kabelende von L}_1 = \frac{2 \times \text{Kabellänge}}{U_1 + (-U_2)} \times U_1 \quad 10$$

$$\text{Kabelende von L}_2 = \frac{2 \times \text{Kabellänge}}{U_1 + (-U_2)} \times (-U_2) \quad 15$$

kontrolliert wird.

[0024] Liegt kein Messfehler in Kabel 1 oder 2 vor, so ergibt die mit U_1 und U_2 berechnete Entfernung bis zum Kabelende jeweils die genaue Kabellänge, was eine permanente Kontrolle des gesamten Messablaufes über alle Systemkomponenten ermöglicht. Dass das Messverfahren ohne Erdfehler bei gleichen Kabellängen am Kabelende einen Erdfehler sieht, liegt daran, dass das Messverfahren in der Lage ist, den Fehlerort unabhängig von der Größe des Erdwiderstandes R_E auszumessen, und somit immer einen Fehlerort findet, der auch im Extremfall für einen Fehlerwiderstand $R_E = \infty$ bei gleicher Spannung von U_1 und U_2 den Fehlerort in der Schleifenmitte sieht. Im vorliegenden Fall wurde zunächst davon ausgegangen, dass die Kabellängen bzw. die einzelnen Phasen gleich lang sind. Diese Annahme trifft bei Einfach-Kabelsystemen nach Fig. 5, wobei sich alle Phasen oder Adern innerhalb eines Kabels befinden, immer zu (z. B. Energiekabel bei Endverbrauchern oder Daten- und Telefonkabel). Einfachkabel lassen sich mit dem angegebenen Messverfahren, auch wenn es sich nicht um Hochspannungskabel handelt, ebenso gut auf Mantel- oder Erdfehler überwachen. Bei diesen Kabeln entfällt lediglich die Problematik der eingekoppelten hohen Wechselstromenergie und diesbezügliche besondere Beschaltungsmaßnahmen.

[0025] Zweifach- oder Dreifach-Kabelsysteme gemäß Fig. 6 und 7, bei denen jede Phase als separates Koaxialkabel verlegt ist, haben in der Regel ungleiche Kabellängen für die einzelnen Phasen. Ungleiche Kabellängen ergeben sich z. B. bei paralleler Kabelverlegung, wenn diese aus Temperaturgründen mit Abstand verlegt werden. Durch parallele Verlegung mit Abstand ergeben sich z. B. unterschiedliche Kurvenradien, die schnell zu einem Längenunterschied von z. B. 30 bis 50 m führen. Um auch Kabelsysteme mit ungleichen Kabellängen der einzelnen Phasen, wo sich die verbundenen Sensordrahtenden nicht mehr in der symmetrischen Schleifenmitte befinden, im fehlerfreien Zustand durch permanente Überwachung des Kabelendes kontrollieren zu können, kann beim beschriebenen Verfahren beim Zweifach-Kabelsystem ein künstlicher Abschlusswiderstand R_A am Schleifenende gemäß Fig. 6 gesetzt werden. Der Abschlusswiderstand R_A erniedrigt den gegen ∞ laufenden Erdfehler R_E auf einen definierten Wert (z. B. 3 M Ω). Durch diese Beschaltung sieht das Messsystem einen vorgegebenen Erdfehler am Kabelende und wird diesen mit der gegebenen Fehlerortgleichung (gemäß Seite 5) ausmessen. Liegt kein wirklicher Mantelfehler vor, so ergibt das Messergebnis über die Sensorphase L_{S1} mit U_1 gerechnet die Kabellänge 1 und über diese Sensorphase L_{S2} mit U_2 gerechnet die Kabellänge 2 an. Beide Messergebnisse zeigen somit kontrollierend auf die verbundenen Kabelenden mit der jeweils wirklichen Kabellänge, wobei Kabel 1 und Kabel 2 nicht nur geringfügig unterschiedlich, sondern beliebige Längen haben können. Der Abschlusswiderstand R_A sollte so hoch ohmig ausgeführt werden, dass eine Mantelfehlerortung noch mit der gewünschten Genauigkeit gegeben ist.

[0026] Besteht der Wunsch, einen Mantelfehler einer 10 km langen Sensorschleife auf 1 m zu orten, so erfordert dies eine Ortungsgenauigkeit von 0,1%. Bei einem beispielhaften Abschlusswiderstand von $R_A = 3 \text{ M}\Omega$ fordert das Messsystem einen Mantelfehler R_E von $< 300 \Omega$, um die Messgenauigkeit von 0,1% = 1 m zu erfüllen. Mantelfehler $< 300 \Omega$ entsprechen der Realität, da der Sensordraht im geerdeten Kabelmantel so eingebettet ist, dass bei Befeuchtung der waserdurchlässigen Sensorisolation sich schnell Widerstandswerte $< 100 \Omega$ einstellen.

[0027] Beim Dreifach-Kabelsystem nach Fig. 7 für Hochspannungs-Drehstromsysteme erfordert das beschriebene Messverfahren auch bei unterschiedlichen Kabellängen keinen Abschlusswiderstand R_A zur Erkennung des Kabelendes ohne vorliegenden Mantelfehler. Das Messsystem schaltet die Phasen beim Dreifach-Kabelanschluss gemäß Fig. 8, wobei eine Sensorleitung am Kabelanfang freigeschaltet ist, jedoch am Kabelende mit den beiden anderen Sensorleitungen verbunden ist. Da jeder Sensordraht im Kabel nur einen endlichen Isolationswiderstand R_E hat, bildet der dritte Sensordraht am Kabelende einen automatischen Abschlusswiderstand R_A gegen Erde. Das Messverfahren ermöglicht somit auch beim Dreiphasenbetrieb ohne Mantelfehler und Abschlusswiderstand einen ständigen Kontrollvergleich der gemessenen Kabellängen mit den wirklichen Kabellängen.

Isolationsmessung

[0028] Da ein Mantelfehler nur von Interesse ist, wenn der Isolationswiderstand des Sensordrahtes gegenüber dem geerdeten Mantel einen wirklich messbaren Isolationsrückgang (z. B. durch Feuchteeinwirkung) aufweist, wird beim vorliegenden Messverfahren zusätzlich eine Isolationsmessung des Sensordrahtes gegen Erde ausgeführt. Das frei programmierbare Messsystem erlaubt dem Anwender zu definieren, bei welcher Unterschreitung des Isolationswiderstandes eine Alarmmeldung ausgegeben wird, um dann mit der nachfolgenden Fehlerortung den Fehlerort des Mantelfehlers auszumessen. Zur Isolationsmessung wird der Konstantstromgenerator 2 gemäß Fig. 9 einseitig von der Sensorschleife abge-

DE 100 19 430 A 1

trennt und mit einem Umschalter 4 gegen Erde geschaltet. Der Konstantstromgenerator, dessen Strom automatisch umschaltbar ist, treibt in dieser Schaltposition gegenüber der Schleifenmessung je nach gewünschtem Messbereich einen ca. 1000fach geringeren Konstantstrom über einen Sensordraht in die offene Sensorschleife über einen gegebenen Erdwiderstand R_E gegen Erde. Der Erdwiderstand ergibt sich zu:

$$R_E = \frac{U_1 \text{ oder } U_2}{I_{\text{Const. ISO}}}$$

[0029] Die Trennung von Gleich- und Wechselspannung bewirken auch in diesem Betriebsfall die gleichen Schaltkomponenten wie beim Schleifenstrombetrieb. Wird der ISO-Messkonstantstrom vorzugsweise mit einer durch 10 teilbaren Größe gewählt (z. B. 10 μA), so gibt der Zahlenwert der gemessenen Spannungen U_1 oder U_2 ohne Umrechnung direkt den Widerstandszahlenwert an.

[0030] Ob der Isolationswiderstand R_E mit der gemessenen Spannung U_1 oder U_2 errechnet wird, ist beliebig, da die beiden Spannungen bei diesen Messungen immer gleich groß sind. Obwohl der Stromgenerator nur über B_{12} nach Sensor L_{S2} eingespeist wird und B_{11} mit Umschalter 4 freigeschaltet ist, besteht eine Verbindung der Sensordrähte am Kabelende gemäß Fig. 5 und 6, so dass auf beiden Sensorleitungen L_{S1} und L_{S2} gleiches Potential herrscht, infolgedessen auch U_1 und U_2 gleich groß gemessen werden.

Schleifenwiderstandsmessung

[0031] Die Schleifenmessung dient der Sensordrahtüberwachung, so dass permanent überprüft wird, ob die Sensorschleife mit ihren bekannten Leitungswiderständen in der möglichen Toleranz durchgängig ist. Diese Messung bedingt beim vorliegenden Messverfahren keine separate Messung, sondern wird aus den für die Fehlerortung gemessenen Größen U_1 und U_2 abgeleitet.

[0032] Der Schleifenwiderstand ergibt sich zu:

$$\text{Schleifenwiderstand } L1, L2 = \frac{U_1 + (-U_2)}{I_{\text{const.}}}$$

$$\text{Schleifenwiderstand } L3, L2 = \frac{U_3 + (-U_2)}{I_{\text{const.}}}$$

Mantelfehlerortung im 1fach-, 2fach- oder 3fach-Kabelsystem

[0033] Die Fig. 5, 6 und 7 zeigen die unterschiedlich vorkommenden Kabelsysteme.

Mantelfehlerortung im 1fach-Kabelsystem

[0034] Fig. 5 zeigt ein Mehrphasenkabel, dass z. B. als Drehstromkabel bis zum Mittelspannungsbereich oder als Daten- und Telefonkabel mit vielen Adernpaaren ausgeführt ist. Bei diesem Einfach-Kabelsystem wird im geschirmten Mantelbereich (der geerdet ist) ein feuchtesensibler Sensordraht und ein isolierter Rückleiter eingebettet, so dass sich eine Messschleife mit einem Kabel realisieren lässt. Vielpaarige Kabel, die keinen besonderen Sensordraht im Mantelbereich mitführen, lassen sich mit dem Messgerät für das beschriebene Messverfahren dennoch überwachen, wenn eine blanke oder perforierte Ader im Kabelinneren mitgeführt ist. Dringt bei einem defekten Kabelaußenmantel Wasser in dieses Kabel, so genügt beim vorliegenden Messverfahren bereits ein hochohmiger Erdschluss, z. B. einige $\text{M}\Omega$, um eine genaue Fehlerortung auszuführen. Die genaue Fehlerortung von Erdfehlern, auch im $\text{k}\Omega$ - und $\text{M}\Omega$ -Bereich, ist ein wichtiger Vorteil des beschriebenen Verfahrens, da bei Verfahren gemäß DE 195 27 972.7 und DE 195 44 391.8 zur genauen Berechnung Erdfehler $\leq 100 \Omega$ vorausgesetzt werden.

Mantelfehlerortung im 2-fach-Kabelsystem

[0035] Das 2fach-Kabelsystem gemäß Fig. 6 unterscheidet sich vom 1fach-Kabelsystem dadurch, dass jede Phase über ein getrenntes Kabel mit einem Sensor im Kabelmantelbereich verlegt ist. 2fach-Kabelsysteme kommen z. B. bei Bahnstromanlagen dort vor, wo keine Freileitungen gespannt sind, sondern vorzugsweise im innerstädtischen Bereich jede Phase als eigenes Erdkabel verlegt ist. Das Messverfahren gemäß Fig. 6 wurde vorstehend bereits ausführlich beschrieben und unterscheidet sich beim Anschluss an das Messsystem nicht vom 1fach-Kabelsystem nach Fig. 5.

Mantelfehlerortung im 3fach-Kabelsystem

[0036] Fig. 7 zeigt die Schaltung eines Dreifach-Kabelsystems. Der Kabelmultiplexer des Mantelfehler-Messsystems ist gemäß Fig. 8 so geschaltet, dass sowohl 2polige 1fach- oder 2fach-Kabelsysteme als auch 3polige 3fach-Kabelsysteme zum Messen aufgeschaltet werden können. Jedes 3polige Kabelsystem benötigt 2 zweipolige Anschlüsse. Beim Dreiphasen-3fach-Kabelsystem wird vom Multiplexer im ersten Schritt Sensor L_{S1} und L_{S2} auf das Messsystem aufgeschaltet und Sensor L_{S3} am Kabelanfang freigeschaltet, so dass Sensor L_{S3} über die verknüpften Sensorenden am Kabel-

ende als Abschlusswiderstand R_A geschaltet ist. Das Messsystem ermittelt zunächst im 1. Schritt für Sensor L_{S1} und L_{S2} die folgenden Parameter:

- A) Isolationswiderstand des Kabelsystems
- B) den Schleifenwiderstand der Kabelsensoren L_{S1} und L_{S2}
- C) Überprüfung der Kabellängen 1 und 2 (wenn kein Mantelfehler vorliegt) oder ggf. alternativ
- C) Angabe der Fehlerortentfernung vom Kabelanfang bis zum Fehlerort für Kabel 1 und 2 (sofern ein Mantelfehler vorliegt)

[0037] Im 2. Schritt schaltet der Multiplexer Sensor L_{S3} und L_{S2} auf das Messsystem und schaltet Sensor L_{S1} am Kabelanfang "frei", so dass der Sensor L_{S1} über die verknüpften Sensorenden am Kabelende als Abschlusswiderstand R_A geschaltet ist. Das Messsystem ermittelt jetzt im zweiten Schritt für Sensor L_{S3} und L_{S2} die Parameter:

- A) Isolationswiderstand des Kabelsystems
- B) den Schleifenwiderstand der Kabelsensoren L_{S3} und L_{S2}
- C) Überprüfung der Kabellänge 3 und 2 (wenn kein Mantelfehler vorliegt) oder ggf. alternativ
- C) Angabe der Fehlerortentfernung vom Kabelanfang bis zum Fehlerort für Kabel 3 und 2 (sofern ein Mantelfehler vorliegt)

[0038] Ein Vorteil des Messsystems nach beschriebenen Verfahren ist darin zu sehen, dass sowohl 1fach-, 2fach- als auch 3fach-Kabelsysteme mit dem gleichen Verfahren und Messegerät überwacht werden können.

[0039] Ein wesentlicher Vorteil ergibt sich des weiteren daraus, dass das Messsystem selbst im 3fach-Kabelsystem beliebige Kabellängen zulässt. Dies ist vergleichsweise beim 3phasigen Messverfahren nach Fig. 1 nicht möglich, da in der Fehlerortgleichung nur eine Kabellänge ausgewiesen ist. Unterscheiden sich die drei Kabellängen, was in der Praxis aufgrund unterschiedlicher Kabelkurven immer gegeben ist, so kann eine Kabelortung nicht genauer werden, als die Kabellängen differieren. Besteht z. B. ein Längenunterschied von 30 m, so ist beim Verfahren nach Fig. 1 von vornherein ein Ortungsfehler dieser Größenordnung gegeben. Messtechnisch gesehen wird das Drehstrom-3fach-Kabelsystem, da nacheinander jeweils 2 Phasen gemessen werden, in zwei 2fach-Kabelsysteme aufgeteilt, wobei die jeweils nicht angeschaltete Phase als Abschlusswiderstand des jeweiligen 2fach-Kabelsystems dient.

[0040] Das 3fach-Kabelsystem wirkt wie ein Drehstromtransformator, wobei die stromdurchflossenen Phasen die Primärwicklungen und die Sensoradern L_{S1} , L_{S2} und L_{S3} die Sekundärwicklungen bilden, die am Kabelende in Sternschaltung verknüpft sind. Am Kabelanfang treiben die drei Sensorphasen aufgrund der induzierten Wechselspannung Strom in jeweils zwei angeschlossene Widerstände. Wie beim 2fach-Kabelsystem, bilden die Widerstände R_{11} und R_{12} mit C_{12} bzw. R_{13} und R_{12} mit C_{13} in Richtung Gleichstromgenerator einen Wechselspannungsteiler, wobei in umgekehrter Richtung für die Gleichstromspeisung der Sensorschleife die Spannungsabfälle an den Widerständen R_{11} , R_{12} und R_{13} aufgrund der Konstantstromspeisung ohne Bedeutung für die abzugreifenden Messspannungen U_1 , U_2 und U_3 sind. Für die optimale Auslegung der Widerstände R_{11} , R_{12} und R_{13} , auf eine möglichst kleine Verlustleistung bezogen, gelten die gleichen Bedingungen wie bereits beim 2fach-Kabelsystem beschrieben. Die Wechselstromfilter R_{S1} , C_{S1} und R_{S2} , C_{S2} zum Abgreifen der Messspannungen U_1 und U_2 bzw. R_{S3} , C_{S3} und R_{S2} , C_{S2} zum Abgreifen der Messspannungen U_3 und U_2 sind, wie beim 2fach-Kabelsystem beschrieben, hochohmig ausgelegt, so dass nur zu vernachlässigende Wechselstromleistungen auftreten. Da es sich um ein Drehstromsystem handelt, wird außer den genannten Wechselspannungsteilern für die beiden verknüpften Zweifach-Kabelsysteme noch ein dritter Teiler, bestehend aus R_{11} und R_{13} mit C_{12} , benötigt, um auch die Wechselspannung zwischen den Phasen L_{S1} und L_{S3} und somit zwischen den Stromeinspeisepunkten I_1 und I_3 auf einen ungefährlichen Wert zu teilen. Die Sensorphasen L_{S1} , L_{S2} und L_{S3} sind über die Widerstände R_{11} , R_{12} und R_{13} elektrisch gesehen in Sternschaltung verknüpft (wie das Kabelende), da die Kondensatoren C_{11} , C_{12} und C_{13} für die Wechselspannung einen Kurzschluss darstellen und die Widerstände R_{11} , R_{12} und R_{13} somit für die Wechselspannung zu einem Punkt verknüpft sind. Da bei Drehstromsystemen sich die Spannung im Sternpunkt auf Grund der Phasenlage zu Null addiert, sieht der speisende Gleichspannungs-Konstantstromgenerator parallel zu den Kondensatoren C_{11} bis C_{13} nur eine vernachlässigbare Rest-Wechselspannung.

Transienten-Schutzbeschaltung

[0041] Alle Schaltungsvarianten weisen gemäß Fig. 5, 6 und 7 Transienten-Schutzbeschaltungen auf, die zum Schutz des nachgeschalteten Messsystems angeordnet sind. Die zuvor beschriebenen Wechselspannungsteiler sind für die auftretenden Nennwechselspannungen des Hochspannungs-Kabelsystems ausgelegt. Treten Überspannungsstörungen durch Blitzschlag oder Kurzschluss-Ströme im Kabelsystem auf, so werden die auftretenden Spannungsspitzen über Transienten-Ableiter zwischen den Phasen oder gegen Erde kurzgeschlossen. Transienten-Ableiter zünden bei einer vorgegebenen Spannung und werden niederohmig. In Verbindung mit den Vorwiderständen R_{11} bis R_{13} und R_{S1} bis R_{S3} ergeben sich so extreme Spannungsteiler zum Schutz der nachgeschalteten Elektronik.

[0042] Zum Schutz der Sensoradern und der Kabelsysteme selbst sind weitere Schutzmassnahmen erforderlich, die die hohen Leistungen, die im Sensordraht auftreten können, unschädlich schalten. Diese Kabelschutzmassnahmen sind nicht beschrieben, müssen jedoch so ausgeführt sein, dass das Messsystem dadurch nicht beeinträchtigt wird, d. h. die Sensoradern L_{S1} , L_{S2} und L_{S3} müssen im Normalbetrieb hochohmig gegen Erde sein und bei Störungen, also Überschreiten einer zulässigen Spannung auf den Sensoradern, niederohmig gegen Erde geschaltet werden, so dass der Sensordraht auf gleichem Potential mit dem Kabelmantel liegt.

Berücksichtigung der Messsignal-Zuleitungswiderstände

[0043] Das steuernde und auswertende Mantelfehler-Messgerät kann in der Praxis nicht direkt, sondern nur über Zuleitungskabel an den Anfang des zu messenden Kabelsystems angeschlossen werden. Da Zuleitungen zwischen einem Messsystem und dem Kabelanfang ähnliche Querschnitte wie die Kabelsensoren aufweisen, würde dies praktisch einer Sensordrahtverlängerung gleichkommen und einen entsprechenden Messfehler in dieser Größenordnung bewirken. Beim Messverfahren nach dem Prinzip Fig. 3 und 4 in der Schaltungsauslegung nach Fig. 5, 6 und 7 wird die Messstromspeisung I_1 , I_2 und I_3 so ausgeführt, dass auf den Zuleitungswiderständen zum Kabelanfang zwar Spannungen abfallen, dies jedoch belanglos ist, da aufgrund der Konstantstromspeisung die Ströme sich nicht ändern und somit auch die Messspannungen U_1 , U_2 und U_3 davon nicht beeinflusst werden.

[0044] Solange eine Konstantstromspeisung gewährleistet ist, können die Messstromzuleitungen somit eine beliebige Länge aufweisen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil des Messverfahrens, da der Anwender ansonsten die Widerstände erfassen und ins System einprogrammieren müsste, um damit eine Korrekturrechnung auszuführen, die wiederum nicht genau sein könnte, da die Temperaturabhängigkeit der gesamten Zuleitung nicht präzise erfassbar ist. Die Messspannungsübertragung U_1 , U_2 und U_3 wird bei den angegebenen Verfahren nach Fig. 5, 6 und 7 über separate stromlose Führlleitungen S_1 , S_2 und S_3 ausgeführt, die direkt an den Sensordrähten L_{S1} , L_{S2} und L_{S3} am Kabelanfang angeschlossen sind. Stromlose Leitungen, bezogen auf die Messgleichspannung, weisen trotz eingefügter Widerstände und Tiefpassfilter keine Gleichspannungsabfälle, sondern nur Wechselspannungsabfälle aufgrund der Tiefpassfilter auf. Hochohmige Messverstärker des Messsystems garantieren eine stromfreie Messspannungsübertragung. Durch diese Maßnahme sind auch die Messleitungslängen S_1 , S_2 und S_3 ohne Berücksichtigung in der Berechnungsgleichung beliebig ausführbar.

Kabel-Kanalmultiplexer

[0045] Der Kabel-Kanalmultiplexer ist Bestandteil des Messsystems und schaltet jeweils programmgesteuert ein Kabelsystem auf das Messgerät auf. Der Kabelkanal-Multiplexer ist gemäß Fig. 8 in Gruppen mit jeweils 4 Phasen ausgeführt. Die 4 Messstromphasen I_1 , I_2 , I_3 und I_4 können entweder mit I_1 , I_2 und I_3 , I_4 auf zwei unabhängige 2fach-Kabelsysteme oder mit I_1 , I_2 , I_3 auf ein 3fach-Kabelsystem geschaltet werden, wobei die Phase I_4 mit der Phase I_2 gebrückt wird, so dass eine Verknüpfung von zwei 2fach-Messsystemen zu einem 3fach-Drehstromsystem erfolgt, bei dem nacheinander zunächst im ersten Schritt die Phasen I_1 und I_2 mit Kanalrelais 1 und im zweiten Schritt die Phasen I_3 und I_2 mit Kanalrelais 2 aufgeschaltet werden. Der vierpoligen Messstrom-Zuleitungsausführung I_1 bis I_4 einer Gruppe sind ebenfalls vier Messspannungsphasen S_1 bis S_4 zugeordnet, deren Schaltung ebenso auf zwei 2fach- oder ein 3fach-Kabelsystem erfolgt. Beim Drehstrom-3fach-Kabelsystem werden zur Verknüpfung ebenfalls entsprechend die Phasen S_2 und S_4 gebrückt, so dass im ersten Schritt S_1 und S_2 mit Kanalrelais 1 und im zweiten Schritt S_3 und S_2 mit Kanalrelais 2 aufgeschaltet werden. Weitere Relaisgruppen mit jeweils zwei Kanalrelais können auf den vierpoligen Bus des Messsystems geschaltet werden. Wird der Multiplexer gemäß Fig. 8 z. B. für 10 Messkanäle ausgelegt, so können 10 zweipolige Kabelsysteme oder alternativ 5 dreipolige Kabelsysteme bzw. eine Mischung aus zwei- und dreipoligen Systemen aufgeschaltet werden. Der Messbus führt 2 Leitungen $B_{11/3}$ und $B_{12/4}$ zur Speisung des Messkonstantstromes und 2 Messspannungs-Führlleitungen $B_{S1/3}$ und $B_{S2/4}$ zur Übertragung der Messspannungen zum Messverstärker.

[0046] Die prinzipielle Zusammenschaltung des Kanalmultiplexers mit den weiteren Komponenten des Messsystems zeigt Fig. 9.

Thermosignal-Kompensation

[0047] Das Mantelfehlerortungssystem soll es ermöglichen, Undichtigkeiten im Kabelmantel auch bei Leitungslängen mit einigen Kilometern möglichst genau im Meterbereich auszumessen. Dies erfordert Auflösungen der Messsignale im μV -Bereich. Hier stellt sich das Problem, dass Zuleitungen und Sensorleitungen an Klemmen und sonstigen Verbindungsstellen Thermospannungen aufweisen, die bereits im mV-Bereich liegen, oder dass am Kabelmantel-Erdfehlerwiderstand R_E durch Wassereinwirkung galvanische Spannungselemente entstehen. Ohne besondere Maßnahme führen Thermospannungen bei jedem Messsystem zu einem Messfehler und galvanische Spannungselemente am Erdübergangswiderstand R_E je nach Größe ggf. zur völligen Fehlmessung. Betrachtet man beispielhaft in Fig. 6 die Messspannung U_1 , so fällt diese über der Länge 1 aufgrund der Konstantstromrichtung als positive Spannung an, wobei die angenommene Elementenspannung an der Fehlerstelle sich gegenüber Erde dazuaddiert. Die Spannung U_1 wird somit durch die Elementenspannung größer. Betrachtet man jetzt die Messspannung U_2 , so fällt diese über der Länge 2 aufgrund der entgegengesetzten Konstantstromrichtung (von U_2 aus gesehen) als negative Spannung an, so dass die positive Elementenspannung subtrahiert werden muss. Die Spannung U_2 wird somit durch die Elementenspannung kleiner. Da die Messspannung U_1 größer und die Messspannung U_2 kleiner gemessen wird, entspricht das Spannungsverhältnis $U_1 : U_2$ nicht mehr dem Längenverhältnis Länge 1 : Länge 2. Aufgrund der unbekannten Elementenspannungen am Erdfehler kommt es somit ohne besondere Schaltungsmaßnahme zu einem Messfehler. Dieser Messfehler wird beim beschriebenen Messverfahren gemäß Fig. 9 aufgrund der eingefügten Messspannungs-Umpolung 3 dadurch behoben, dass jede Messung sowohl mit einer positiven Quellspannung als auch mit einer negativen Quellspannung ausgeführt wird. Dies führt zu einer Umpolung der Konstantstromrichtung in der Sensorschleife und damit zu einer Polaritätsänderung von U_1 und U_2 gegenüber dem Erdpotential. Da die Polarität der Elementenspannungen am Erdübergangswiderstand R_E durch die metallischen Elemente gegeben ist und sich somit nicht umkehrt, wird diesmal bei umgekehrter Polarität von U_1 und U_2 , U_1 kleiner und U_2 größer. Dies führt ebenfalls zu einer fehlerhaften Messung, wobei jedoch der Erdfehler gegenüber der ersten Messung und dem wirklichen Fehlerort in entgegengesetzter Richtung fehlerhaft ist. Eine Mittelung des positiv und negativ falschen Messergebnisses führt zur Kompensation der Elementenspannung und somit zum korrekten Fehlerort. Durch Zweifach-Messung mit umgepolter Schleifenstromrichtung des Konstantstromgenerators werden somit auf gleiche Art auch Thermospannungseffekte beseitigt. Eine sofortige Mittelung der Messspannungen nach der

$$\text{Beziehung} \quad \frac{\text{pos. } U_1 + (\text{neg. } U_1 \times -1)}{2} = U_{1 \text{ Mittel}}$$

$$\text{und} \quad \frac{\text{pos. } U_2 + (\text{neg. } U_2 \times -1)}{2} = U_{2 \text{ Mittel}}$$

Ergebnisse eingesetzt in die Fehlerort-Verhältnisrechnung

$$\text{Fehlerort von L1} = \frac{\text{Sensorlänge 1} + \text{Sensorlänge 2}}{U_{1 \text{ Mittel}} + U_{2 \text{ Mittel}}} \times U_{1 \text{ Mittel}}$$

und

$$\text{Fehlerort von L2} = \frac{\text{Sensorlänge 1} + \text{Sensorlänge 2}}{U_{1 \text{ Mittel}} + U_{2 \text{ Mittel}}} \times U_{2 \text{ Mittel}}$$

ergibt direkt eine richtige Fehlerortangabe.

[0048] ist ein Drehstrom 3-fach-Kabelsystem zu messen, so wird im 2. Messschritt durch den Multiplexer Fig. 8 Sensorphase L3 und L2 aufgeschaltet.

[0049] In den vorstehenden Fehlerortungsgleichungen wird der Messwert $U_{1 \text{ Mittel}}$ durch $U_{3 \text{ Mittel}}$ ersetzt.

$$U_{3 \text{ Mittel}} = \frac{\text{pos. } U_3 + (\text{neg. } U_3 \times -1)}{2}$$

[0050] Aus prinzipiellen Gründen einer selbstständigen Messung der Sensorschleife $L_{S3} \rightarrow L_{S2}$, werden auch die Messwerte der Referenzphase L_{S2} nochmals erfasst und eine eventuelle Fehlerortangabe sowohl vom Kabelanfang L_{S3} als auch vom Kabelanfang L_{S2} berechnet.

Ermittlung der genauen Phasenlängen im 3fach-Kabelsystem

[0051] Beim Drehstrom-3fach-Kabelsystem sind die Phasenlängen nicht zwangsläufig gleich lang, sondern in der Regel aufgrund unterschiedlicher Verlegeradien verschieden lang.

[0052] Für eine evtl. Fehlerortberechnung müssen die Phasenlängen der 3 Kabel im Messsystem gespeichert sein, da die Kabellängen in die jeweilige Fehlerortgleichung eingesetzt werden. Je präziser die Kabellängen vorliegen, um so genauer wird die Fehlerortung. Beim vorliegenden Messverfahren ist es möglich, mit nur einer Referenzphasenlänge, dessen Länge mechanisch genau ausgemessen werden muss, die Länge der beiden anderen Phasen elektrisch mit dem Messsystem zu ermitteln. Als Referenzphase wird vorzugsweise die mittlere Phasenlänge 2 genommen, da diese im Radienverlauf eine mittlere Länge zwischen dem kürzeren Innenradius und dem längeren Aussenradius der 3 parallel verlaufenden Phasen darstellt. Die Ermittlung der gesuchten Phasenlänge erfolgt nach der Beziehung

$$\text{gesuchte Phasenlänge} = \frac{U_{\text{Mittel}} \text{ gesuchte Phase}}{U_{\text{Mittel}} \text{ Ref. Phase}} \times \text{Länge Ref. Phase}$$

[0053] Die elektrische Ermittlung der beiden fehlenden Phasenlängen hat folgende Vorteile:

- Weniger Aufwand als die manuelle mechanische Längenmessung.
- Es gehen nicht 3 unbekannte Längenfehler, sondern nur 1 mechanischer Längenfehler der Referenz-Sensorphase ein, dessen prozentualer Fehler für alle Phasen gleich ist und somit eine höhere absolute Messgenauigkeit erreicht wird.
- Die Kontrolllängenmessung der 3 Phasen durch das Messsystem ist erheblich besser reproduzierbar, da die kontrollierten Längen sonst von den mechanisch ermittelten einprogrammierten Längen immer um die unbekannten Messfehler abweichen würden.

[0054] Um die Längenmessung der unbekannten Kabellängen unabhängig von gegebenen Isolationswiderständen der Sensordrähte ausführen zu können, ist es erforderlich, den jeweiligen gemäß Fig. 8 freigeschalteten Anfang der 3. Sensorplatte direkt niederohmig zu erden, da es ansonsten bei geringen Isolationswiderständen, die gleichmäßig über die Sensorlängen verteilt sind, zu Abweichungen der korrekten Kabellänge kommt, da die Sensordrahtwiderstände durch die parallel geschalteten Isolationswiderstände verfälscht werden. Es gilt hier die bereits genannte Voraussetzung, dass der Erdwiderstand am Kabelende um den Prozentsatz der gewünschten Messgenauigkeit kleiner sein muss, als der Isolationswiderstand der Sensordrähte.

[0055] Vorteilhaft ist bei der Erfindung u. ä., dass der Messstrom in einer Sensorphase nicht vom Fehlerwiderstand R_F beeinflussbar ist, weil wegen der potentialfreien Stromeinspeisung grundsätzlich kein Messstrom über einen auftretenden Fehlerwiderstand gegen Erde fließen kann und thermische Einflüsse keinen instabilen Zustand eines undefinierten Erdschluss-Übergangswiderstandes während einer Messung bewirken können. Ferner werden alle der Sensorschleife vorgeschalteten Widerstände und Leitungslängen inkl. der Sensorwiderstände selbst aus der Ortungsgleichung elimi-

niert, so daß Änderungen oder Schwankungen von deren Werten nicht zu Verfälschungen führen oder kompensiert werden müssen, sondern die Spannung über der Sensorschleife konstant bleibt und damit sich nur das Verhältnis der am Anfang und Ende der Schleife gemessenen Teilspannungen – unabhängig von allen Zuleitungswiderständen – mit dem Fehlerort ändert.

5

Patentansprüche

1. Mantelfehlerortungsverfahren für Kabel, bei dem in eine Sensorader eines Kabels oder Kabelsystems ein Messstrom eingespeist wird und bei einem Kabelmantelfehler auftretende Messsignaländerungen ausgewertet werden, **dadurch gekennzeichnet**,
 - dass eine die Sensorader einschließende Sensorschleife gebildet wird,
 - dass in die Sensorschleife ein konstanter Messstrom erdfrei eingespeist wird,
 - dass die dabei am Anfang und Ende der Sensorschleife gegenüber einem Bezugspotential (Erde) auftretenden Spannungen gemessen werden,
 - und dass durch Bildung des Verhältnisses dieser Spannungen der Fehlerort bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Messstromeinspeisung während einer Fehlerortung zur Messfehlerkompensation für Thermospannungen an Klemmstellen der Zuleitung oder Sensorleitung sowie zur Kompensation einer Elementspannung am Erdübergangswiderstand (R_E) umgepolt wird und die Beträge der dabei auftretenden positiven und negativen Meßspannungen gemittelt werden.
3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Einfach- und Zweifach-Kabelsystem zusätzliche Widerstände (R_{11} und R_{12}) in den Messstromleitungen (I_1 und I_2) in Verbindung mit einem Kondensator (C_1) einen Wechselspannungsteiler bilden, wobei der Messgleichstrom parallel zum Kondensator (C_1), an dem fast keine Wechselspannung steht, da diese an den Widerständen (R_{11} und R_{12}) abfällt, in die Sensordrahtschleife eingespeist wird.
4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass beim Drehstrom-Dreifach-Kabelsystem zusätzliche Widerstände (R_{11} , R_{12} , R_{13}) in den Messstromleitungen (I_1 , I_2 und I_3) in Verbindung mit Kondensatoren (C_{11} , C_{12} , C_{13}) für den Wechselstrom eine elektrische Sternschaltung bilden, wobei die Kondensatoren (C_{11} bis C_{13}) mit so niedriger Impedanz ausgelegt sind, dass diese für die Sensorwechselspannung als Kurzschlussbrücke hinter den Widerständen (R_{11} bis R_{13}) zu sehen sind, und wobei sich im Stempunkt die Drehstromphasenspannungen aufgrund der Phasenlage zu Null addieren, so dass parallel zu den Kondensatoren, an denen nur noch eine unschädliche Restwechselspannung steht, der Messgleichstrom in die gewählte Sensordrahtschleife eingespeist werden kann.
5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Messspannungen (U) vom Sensordraht am Kabelanfang über gleichstromfreie Fühlleitungen (S_1 und S_2 bzw. S_3 und S_2) über Filterwiderstände (R_S), die in Verbindung mit den Kondensatoren (C_S) einen Wechselspannungsteiler bilden, dem Messsystem zugeführt werden und dass aufgrund der hohen Impedanz eines Messverstärkers die Fühlleitungen (S_1 bis S_3) eine beliebige Leitungslänge haben können.
6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Drehstrom-Dreifach-Kabelsystem simultan jeweils zwei Sensorphasen gemessen werden, während die dritte Sensorphase am Kabelanfang freigeschaltet und am Kabelende mit den anderen Phasen verbunden einen Abschlusswiderstand (R_A) bildet, so dass auch bei fehlerfreien Kabelmänteln des Systems alle Phasen ohne künstlichen Abschlusswiderstand auf ihre Kabellänge hin kontrollierbar sind.
7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Kabellängen ungleich lang sind, insbesondere auch bei Dreiphasen-Dreifach-Kabelsystemen die Kabellängen ohne Einschränkung der Messgenauigkeit beliebig lang sind.
8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine infolge der Konstantstromspeisung absolute Kurzschlussfestigkeit des Messsystems und durch eine konstante Verlustleistung aller Widerstände im Messkreis unabhängig von einem evtl. Sensorkurzschluss oder Erdschluss an beliebiger Stelle.
9. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass jeweils zwei gemessene Spannungen erfasst werden, deren Verhältnis direkt dem Verhältnis der Kabellängen bis zum Fehlerort entspricht.
10. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine solche Parameterauslegung, dass mit dem erfassten Messspannungspaar (U_1 , U_2 und U_3 , U_2) aufgrund der Konstantstromspeisung ohne Zusatzmessung unmittelbar der Schleifenwiderstand zur Funktionskontrolle des Sensordrahtes vorliegt.
11. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass beim Einfach-Kabelsystem, sowohl bei Mehrphasen- als auch beim Koaxialkabel im geschirmten Mantelbereich, sowohl ein feuchtigkeitssensibler Sensordraht als auch ein isolierter Rückleiter eingebettet ist, die am Kabelende zusammengeschaltet eine Messschleife ergeben.
12. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei vielpoligen Kabeln (z. B. Telefonkabel) ohne Sensordraht im Kabelmantel mit einem Adempaar im Inneren, wovon vorzugsweise eine Ader als Sensordraht perforiert ist, überwacht werden können.
13. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen Multiplexer (Fig. 8) zur gemischten Aufschaltung und Messung von sowohl Einfach-, Zweifach- als auch Dreifach-Kabelsystemen unter Anwendung einer Fehlerortgleichung.
14. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Drehstrom-Dreifach-Kabelsystem mit nur einer bekannten Referenz-Phasenlänge die genauen Kabellängen der beiden anderen Phasen mit dem Messsystem selbst ermittelt werden, indem mit der bekannten Referenzphase jeweils mit einer weiteren unbekannten Phasenlänge eine Schleifenmessung ausgeführt wird, während über die dritte Phase ein Erdschluss auf das Kabelende geschaltet wird.

DE 100 19 430 A 1

15. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch
- eine potentialfreie und ggf. stromrichtungsumschaltbare Konstantstromquelle (I_{const}) zur erdfreien Einspeisung eines konstanten Messstroms in eine unter Einschluss einer im Kabel enthaltenen Sensorader gebildeten Sensorschleife,
 - an den Anfang und das Ende der Sensorschleife angeschlossene Spannungsmesser zur Messung der dort aufgrund des Messstroms auftretenden Messspannungen (U_1, U_2 bzw. U_3, U_2),
 - und durch einen Quotientenbildner, dem diese Messspannungen zugeführt werden zur Lieferung eines Ausgangswertes als Mass für die Entfernung der Fehlerstelle von der Messstromeinspeisungsstelle.
16. Vorrichtung nach Anspruch 15, gekennzeichnet durch Filterschaltungen (R_f, C_f bzw. R_s, C_s), zur Unterdrückung von Wechselspannungen bei der Messstromeinspeisung bzw. bei der Messspannungsabnahme.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

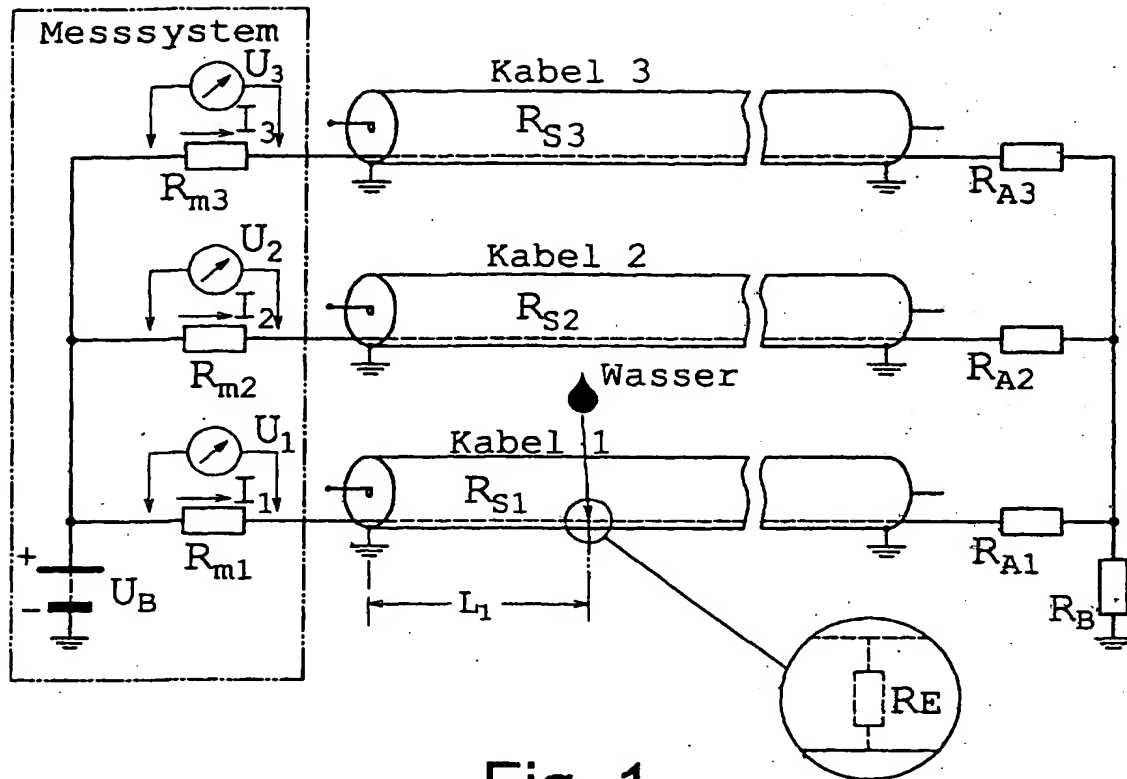


Fig. 1

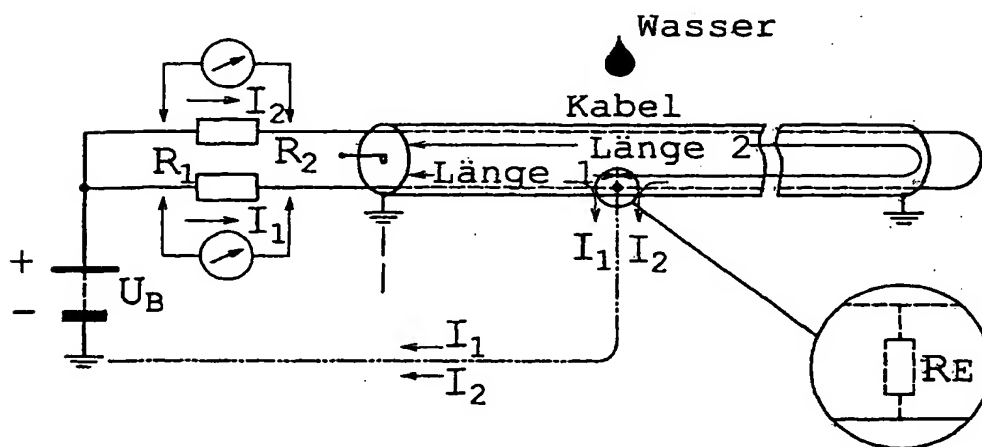


Fig. 2

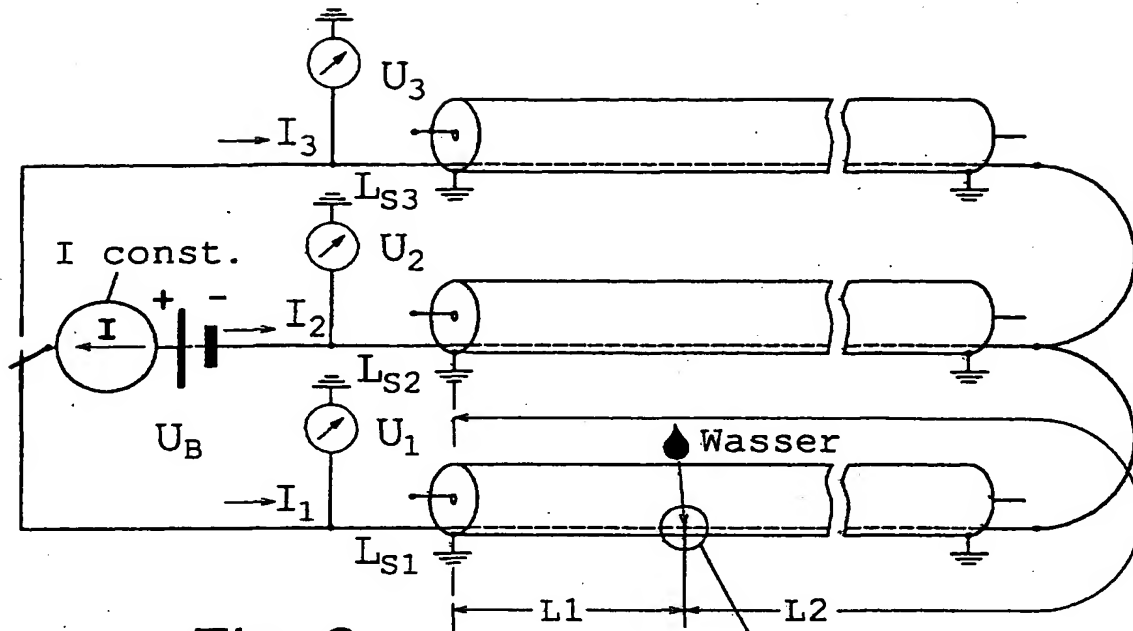


Fig. 3

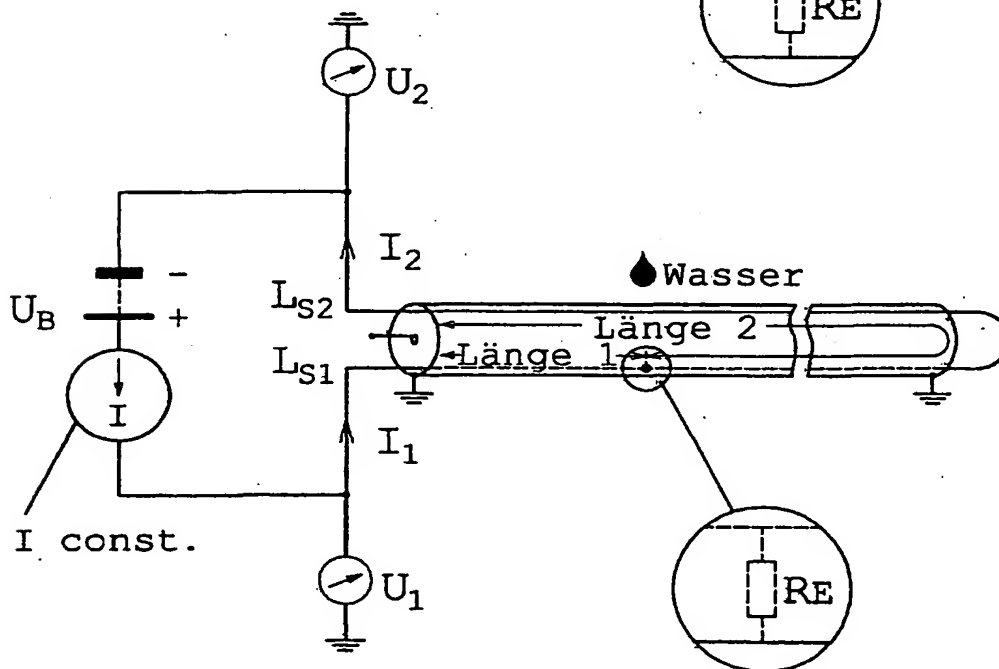


Fig. 4

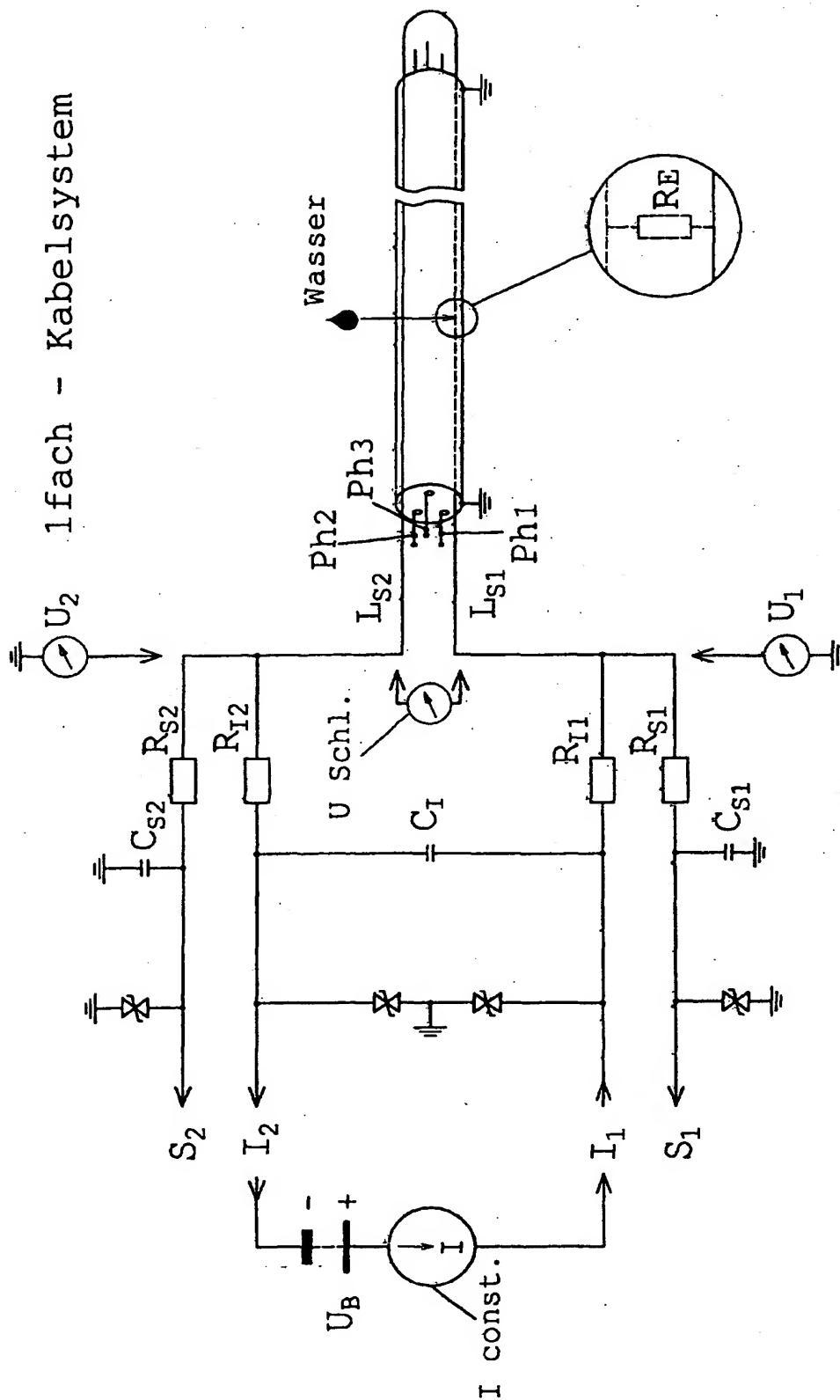


Fig. 5

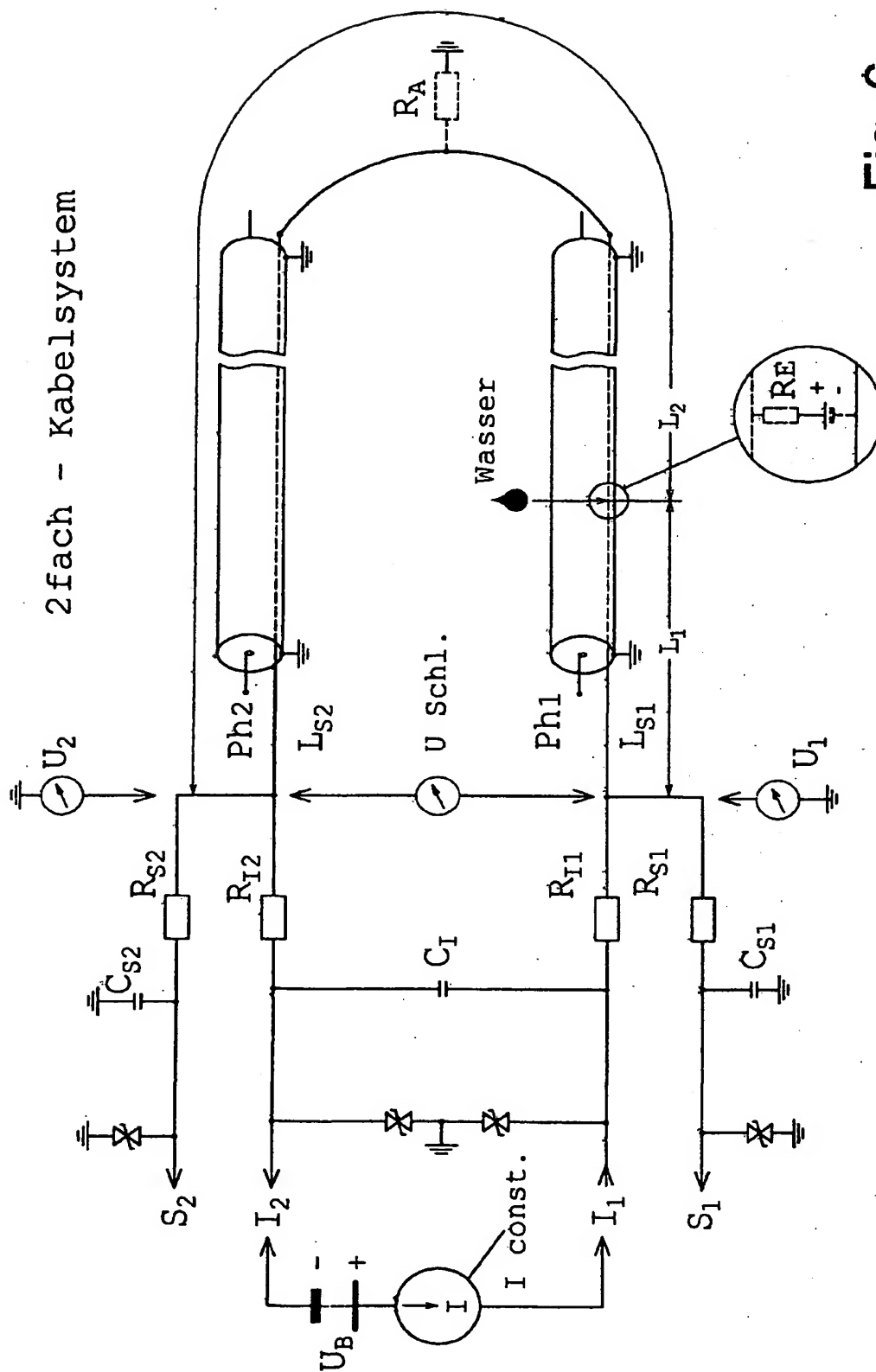


Fig. 6

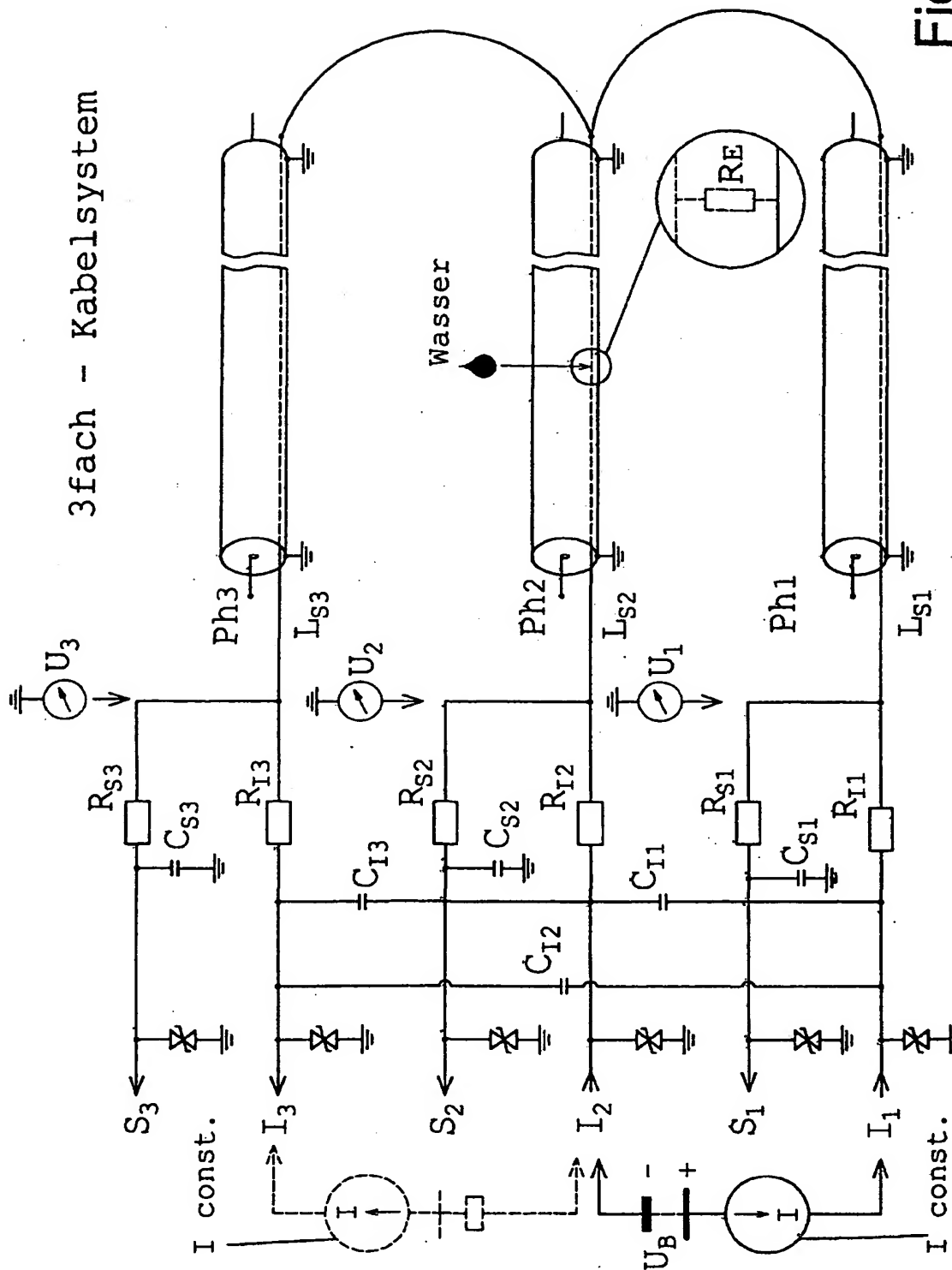


Fig. 7

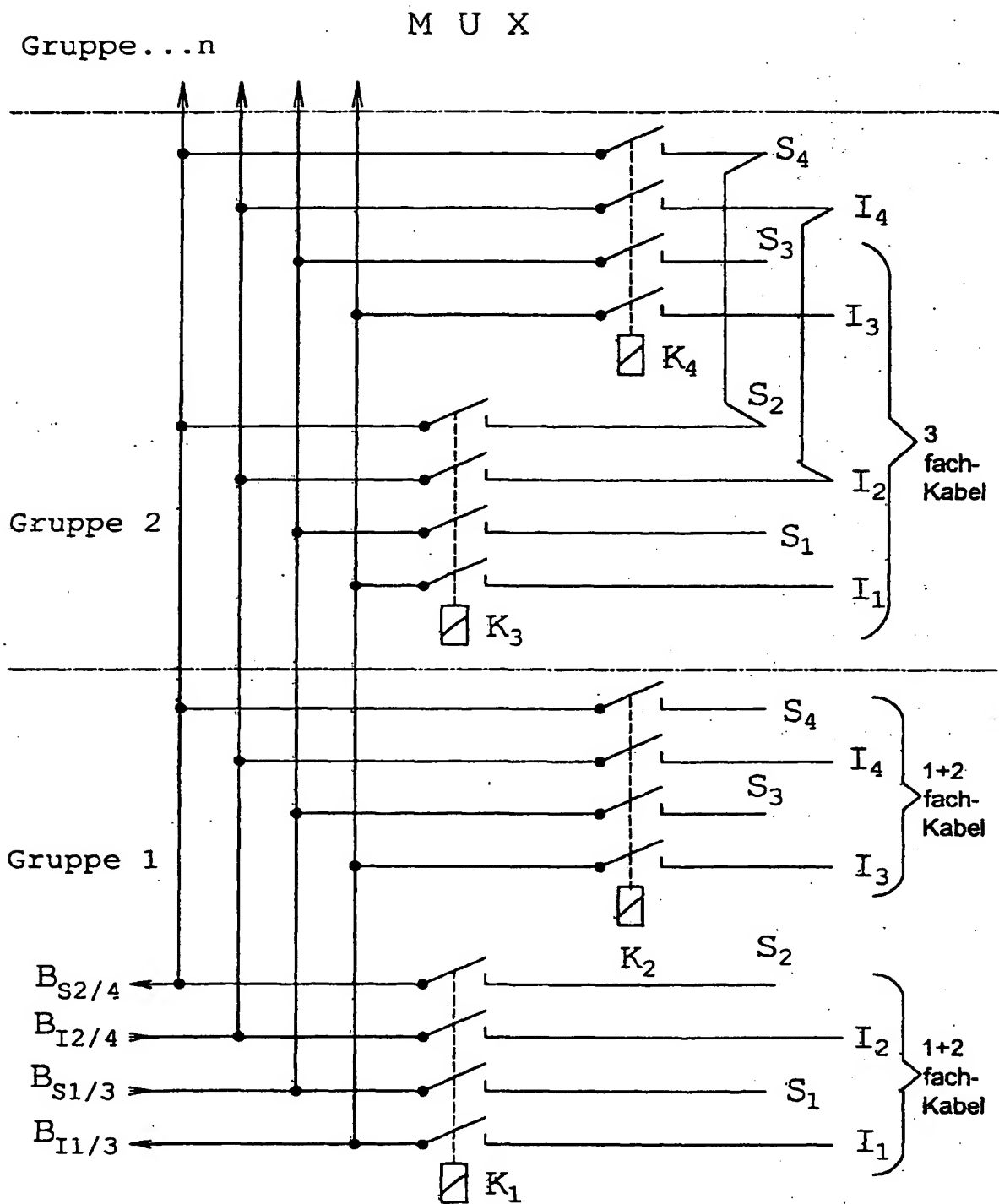


Fig. 8

